



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

**DRUHY ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK A ZPŮSOBY
ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT**

TYPES OF FATIGUE TESTS AND METHODS OF DATA PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Lamrich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Richard Lamrich**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Druhy únavových zkoušek a způsoby zpracování naměřených dat

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prezentace únavových zkoušek ve formě křivek životnosti (Wohler, Manson–Coffin, Gassner lines,..) je pevně spojeno s druhem/typem únavové zkoušky. Je nutné mít k dispozici nejen křivku životnosti, ale také informaci spojenou s typem poruchy (iniciace trhliny, lom součásti, ..) a taktéž, jakým způsobem byla data pro křivku zpracována. Práce studenta bude zaměřena na třídění únavových zkoušek podle vybraných kritérií a způsobů zpracování experimentálních dat do křivek životnosti.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše (přehled experimentálních metod, zpracování dat)
- zpracování vybrané úlohy (tvorba křivky životnosti z exper. dat)
- analýza výsledků
- závěr

Seznam doporučené literatury:

DYLAĞ, Zdisław a Zbigniew ORŁOŚ. Únava materiálu a její zkoušení. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968.

DOWLING, Norman E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška,
CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalárska práca je zameraná na vykonávanie únavových skúšok a tvorbu kriviek životnosti. V prvej časti sú za účelom teoretického základu spracované tri štádia únavového procesu. Ďalej sa práca sústreďí na rozdelenie metód vykonávania únavových skúšok a strojov, ktoré sa na tieto skúšky používajú a ukazuje za akých okolností je vhodné ich použiť. Posledná časť práce je venovaná spôsobom tvorby kriviek životnosti.

Kľúčové slová

Krivka životnosti, amplitúda napätia, porušenie, únavová skúška

Abstract

Bachelor thesis is focused on fatigue testing and creating of S-N curves. In the first part three main stages of fatigue life are processed in order of making theoretical knowledge needed. Next the thesis is focused on dividing methods for making these tests and machines that are used for these tests and shows under which circumstances they are appropriate to use. Last part is dedicated to methods of creating of S-N curves.

Keywords

S-N curve, stress amplitude, failure, fatigue test

Bibliografický záznam

LAMRICH, R. *Druhy únavových zkoušek a způsoby zpracování naměřených dat*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú bakalársku prácu vypracoval samostatne pod odborným vedením Ing. Petra Vosynka, Ph.D. s použitím uvedenej literatúry.

V Brne dňa 26.5.2017

.....
Richard Lamrich

Pod'akovanie

V tomto odstavci by som chcel predovšetkým poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce pánovi Ing. Petrovi Vosynkovi, Ph.D. za veľmi cenné rady a pripomienky, tiež za jeho ochotu a obetavosť. Zároveň by som chcel samozrejme taktiež poďakovať mojím rodičom, za podporu počas celého môjho štúdia.

Obsah

Úvod.....	10
Únava materiálu	10
Štádium zmeny mechanických vlastností.....	11
Štádium vzniku trhliny	12
Štádium rastu trhliny	12
Metódy únavových skúšok.....	15
Rutinné skúšky	16
Skúšky porušenia všetkých vzoriek.....	16
Skúšky porušenia časti vzoriek.....	17
Skúšky nízkokyклоvej únavy	18
Skúšky vysokocyклоvej únavy	18
Reakčné skúšky.....	18
Probitová metóda	18
Schodisková metóda	19
Skúšky s rastúcou amplitúdou	20
Kroková skúška.....	20
Protová skúška	20
Skúšky kumulovania poškodenia	20
Skúšky predzaťaženia	21
Skúšky predpätia.....	21
Skúšky napodobňujúce reálny situácie (Service-simulating tests).....	21
Programové skúšky.....	22
Rozsahové skúšky.....	22
Stroje pre vykonávanie únavových skúšok	23
Zaťaž produkovaná mechanickým vychýlením.....	23
Zaťaž vytvorená odstredivou silou	24
Zaťaž produkovaná elektromagnetickými silami	24
Zaťaž vyprodukovaná hydraulickými silami.....	25
Tvorba krivky životnosti	26
Záver	29
Zoznam použitej literatúry	30
Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	31
Zoznam obrázkov.....	32

Úvod

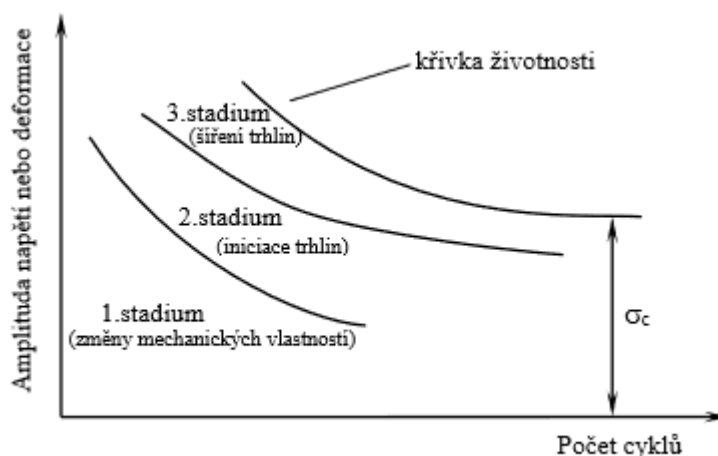
V dnešnej dobe sa v praxi častejšie stretávame so situáciou, že na súčiastkach strojov alebo konštrukcií dochádza k porušeniu pri zaťažení malom pravidelne sa opakujúcom namiesto porušenia spôsobeného od zaťaženia väčšieho ako je medza klzu. Tento jav nazývame únavou materiálu. Výraz pochádza z latinského slova *fatigare*, ktoré v angličtine znamená „to tire“, v slovenčine unaviť. Tento názov sa dá považovať za najvýstižnejší, pretože únava materiálu je proces nahromadenia poškodenia a následného lomu v dôsledku kumulácie cyklického zaťaženia.

Únava materiálu

Únavový proces je možné na základe časového priebehu popísať v troch štádiách. Prvé štádium nazývame štádiom zmeny mechanických vlastností. Od zvyšných dvoch sa líši tým, že zmeny prebiehajú v celom objeme skúmanej súčasti. Dochádza k zmenám v hustote a poruchám v mriežke a tým pádom k zmene mechanických vlastností. Zmeny mechanických vlastností môžeme rozdeliť do dvoch skupín a to cyklické spevňovanie a cyklické zmäkčovanie.

V druhom štádiu vzniká mikrotrhlina na povrchu súčastky, alebo v jej vnútri počas pôsobenia cyklického zaťaženia a teda ho nazývame štádium vzniku trhliny. Toto štádium sa už netýka celého objemu súčasti, ale len jej malej časti. Či už trhlina vzniká na povrchu, alebo vo vnútri súčasti, vždy je v tomto procese zahrnutá cyklická plastická deformácia.

Posledné štádium nazývame štádium šírenia trhliny. Rovnako ako v štádiu vzniku trhliny, ani tu sa nezameriavame na celý objem súčasti ale len na jej malú časť. Štúdiou šírenia trhlín sa zaoberá lomová mechanika a spôsob šírenia je závislý na vlastnostiach plastickej zóny na čele trhliny, kde je cyklická plastická deformácia najviac zastúpená. [1]



Obr. 1: Štádiá únavového procesu [1]

Štádium zmeny mechanických vlastností

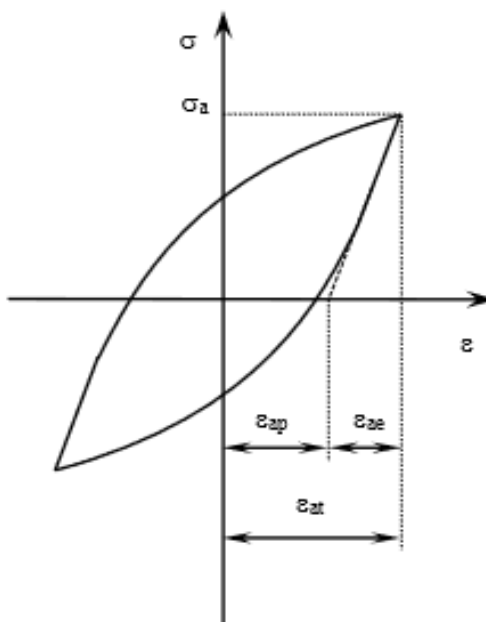
Ako bolo vyššie písané počas prvého štádia cyklického zaťažovania dochádza k zmene v mikroštruktúre, ktorá sa prejavuje zmenou mechanických, elektrických, magnetických a ďalších fyzikálnych vlastností. Z únavového hľadiska sú najdôležitejšie zmeny mechanických vlastností a to hlavne schopnosť materiálu odolávať plastickej deformácii.

Zmena odporu materiálu voči cyklickej deformácii môže mať počas zaťažovania rôzne priebehy a to rásť, klesať alebo mať úplne iný priebeh.

Z hľadiska zmien mechanických vlastností môžeme materiály rozdeliť do dvoch skupín:

1. Saturujúce: materiály pri ktorých po istom počte cyklov zmena vlastností prestane úplne, alebo je zanedbateľne malá.
2. Nesaturujúce: zmeny mechanických vlastností prebiehajú počas celej doby zaťažovania.[1]

K zaznamenávaniu zmien mechanických vlastností sa používajú takzvané hysterézne slučky. Prístroje v dnešnej dobe sú schopné počas zaťažovania udržiavať konštantnú amplitúdu napätia, vtedy sa jedná o inak známe mäkké zaťažovanie, alebo konštantnú amplitúdu plastickej deformácie, inak známe aj ako tvrdé zaťažovanie. Pri držaní jednej hodnoty konštantnej sa mení hodnota druhej a vzhľadom na jej rast alebo pokles môžeme zväziť, či sa jedná o cyklické spevňovanie, alebo zmäkčovanie. Cyklické spevňovanie a zmäkčovanie majú vplyv na tvar a plochu hysteréznej slučky. Cyklické spevnenie je príznačné pre vyžíhané kovy a cyklické zmäkčenie pre kovy spevnené iným známym spôsobom. Cyklické zmäkčenie spôsobuje v materiáloch pre praktické využitie nežiaduci efekt a preto sa mu snažíme vyhnúť. [2]



Obr. 2: Schéma hysteréznej slučky [1]

Štádium vzniku trhliny

Toto štádium zahŕňa obdobie vzniku trhliny v miestach, kde nahromadené napätie spôsobuje cyklickú plastickú deformáciu. Takto vzniknutá plastická deformácia v miestach povrchových alebo objemových defektov vytvára trhliny. V ideálnom prípade, pre dokonale homogénne materiály s dokonale hladkým povrchom rovnomerne zaťaženým, by únavový proces pravdepodobne neprebehol, ale materiál by sa deformoval elasticky a po odstránení zaťaženia by sa vrátil do svojho pôvodného stavu. Žiaľ, takéto podmienky v skutočnosti zabezpečiť nedokážeme, pretože súčasť bude vždy obsahovať malé percento nehomogenity alebo nejaké defekty spôsobené pri výrobe a teda pri zaťažení nastane pohyb dislokácii, z ktorého čo i len malá časť bude určite nevratná. Malé nečistoty obsiahnuté v materiály, nedokonalosti povrchu alebo plasticky sa deformujúce zrno pôsobia ako lokálne koncentrátory napätia, ktoré ďalej vedú k vzniku a následnému šíreniu trhliny.

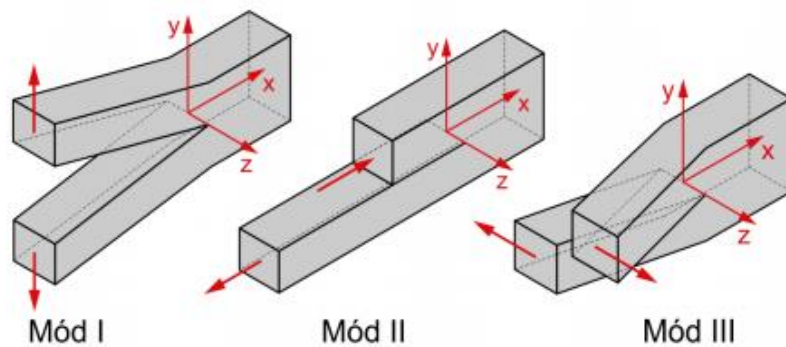
Pre vznik únavovej trhliny je nevyhnutné aby boli obsiahnuté tri podmienky a to menovite významná vrubová topografia, plastická deformácia umiestnená v koreni trhliny a vhodné dislokačné usporiadanie pozdĺž povrchových intruzií. Je navrhnuté veľké množstvo mechanizmov popisujúcich vznik mikrotrhliny no v tejto práci vymenujem aspoň najhlavnejších päť a to sú: (1) modely nerozlišujúce medzi intruziou a mikrotrhlinou, (2) vznik krehkým prasknutím v koreni intruzie, (3) vznik trhliny kondenzáciou vakancii, (4) dekohezia kryštálu pozdĺž klznej roviny spôsobená nahromadením dislokácii, (5) vznik na hraniciach zŕn. [1]

Dodnes nie je jasné a neexistuje žiadna tabuľková hodnota, ktorá by presne stanovovala, do akej hĺbky a veľkosti ešte môžeme hovoriť o štádiu vzniku trhliny a od akej veľkosti už uvažujeme štádium rastu trhliny. Tieto dva procesy sú spojené a je len na nás zvoliť si veľkosť počiatočnej dĺžky trhliny od ktorej už ďalej uvažujeme štádium šírenia trhliny. Počet cyklov potrebných do vzniku tejto nami zvolenej počiatočnej dĺžky trhliny označujeme N_0 a počet cyklov potrebných do lomu súčasti N_f . Pomer hodnôt N_0 k N_f slúži ako miera dĺžky nukleačného štádia. Hodnota nukleačného štádia je priamo závislá od amplitúdy zaťaženia, geometrie telesa, vrubov, materiálových hodnotách alebo teploty okolia, v ktorých skúška prebieha. [1]

Štádium rastu trhliny

V štádiu vzniku trhlín samozrejme nevzniká trhlina len jedna, ale je ich viac, no len tá najväčšia pokračuje ďalej a začne sa šíriť. Na počiatku sa trhlina šíri vo vhodnej kryštalografickej rovine, blízkej maximálneho šmykového napätia a neskôr sa stáča do smeru kolmého na hlavné napätie. To, že súčasť obsahuje trhlinu ešte samo o sebe nemusí znamenať, že po cyklickom namáhaní nastane lom. To, či k lomu dôjde ovplyvňujú tvar a rozmer trhliny, charakter napätosti, rýchlosť šírenia trhliny a v neposlednom rade aj materiálové vlastnosti. Vedný obor, ktorý skúma to, či lom nastane sa nazýva lomová mechanika. [2,3]

U telesa s trhlinou môžu nastať tri základné prípady zaťaženia. Každý ďalší prípad potom vzniká ako superpozícia týchto troch zaťažovacích módov.



Obr. 3: Tri základné módy zaťažovania telesa s trhlinou [3]

Mód I nazývame normálový, mód II šmykový a mód III antirovinný.

Asi najrozšírenejší spôsob pre popis lineárne pružnej napätosti a deformácie v telese s trhlinou sa nazýva K-konceptia. Veličina, ktorá sa používa pre vyjadrenie napjatosti a deformácie v okolí čela trhliny sa nazýva súčiniteľ intenzity napätia a značíme ho K .

Hodnotu faktoru intenzity napätia vypočítame podľa vzťahu:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \times Y_1\left(\frac{a}{b}\right), \quad (1) \quad \text{kde}$$

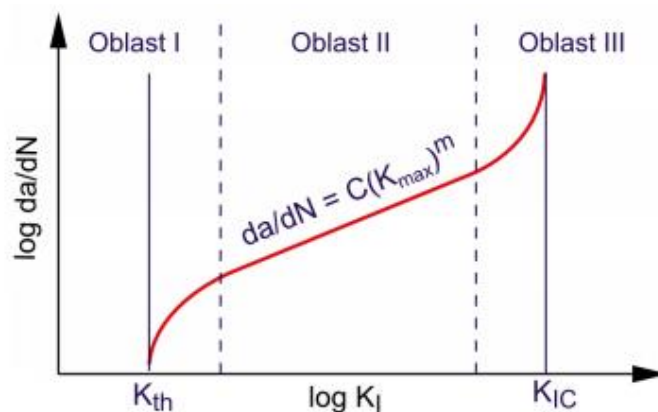
K_I je súčiniteľ intenzity napätia v zaťažovacom móde I

σ je nominálne napätie na telese bez ohľadu na vplyv trhliny

$Y_1\left(\frac{a}{b}\right)$ je tvarová funkcia, ktorá popisuje vplyv geometrie telesa a upresňuje výpočet

Pre posúdenie chovania súčasti s trhlinou sa takto vypočítaná hodnota ďalej porovnáva s materiálovými charakteristikami K_{th} a K_{IC} , kde K_{th} nazývame prahovou hodnotou a K_{IC} lomovou húževnatosťou. Vzhľadom na hodnotu K_I môžu nastať tieto situácie:

1. $K_I < K_{th}$ - trhlina sa nešíri
2. $K_{th} < K_I \cap K_I < K_{IC}$ - trhlina sa šíri stabilne
3. $K_I > K_{IC}$ - trhlina sa šíri nestabilne, nastáva medzný stav lomu



Obr. 4: Závislosť rýchlosti šírenia trhliny na súčiniteli intenzity napätia [3]

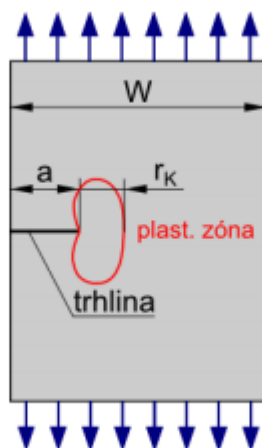
Z obrázka 4 si môžeme všimnúť, že oblasť stabilného šírenia trhliny je popísaná viacerou lineárnou a rýchlosť šírenia trhliny v tejto oblasti môžeme spočítať podľa Paris-

Erdoganovej rovnice $v_t = \frac{da}{dN} = C(K_I)^m$, (2) kde C a m sú materiálové charakteristiky. Rovnako pomocou integrácie sme schopní spočítať počet cyklov do lomu. V oblasti koreňa trhliny dochádza k lokálnemu prekročeniu medze klzu materiálu a vzniká tam plastická oblasť. Veľkosť plastickej oblasti spočítame podľa vzťahu:

$$r_k = \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_k} \right)^2, \quad (3)$$

kde pre rovinnú napätosť volíme hodnotu $\alpha = \frac{1}{2}$ a pre stav rovinnej deformácie $\alpha = \frac{1}{6}$

Pre platnosť výsledkov získaných využitím K-koncepcie je potrebné overiť, či hodnota plastickej oblasti je zanedbateľne malá (asi desaťkrát menšia) v porovnaní s počiatočnou dĺžkou trhliny a . Ak by táto podmienka splnená nebola, nemôžeme takto získané výsledky považovať za platné. [2,3]



Obr.5: Plastická oblasť v telese s trhlinou [3]

Metódy únavových skúšok

Cieľmi únavových skúšok je určenie únavového života súčasti, alebo miesta vzniku porušenia na skúšobnom telese podrobenému vopred určenej postupnosti amplitúd napätí. V niektorých prípadoch toto môže byť jediný dôvod robenia skúšky, napríklad zložitejšie zostavy sa podrobujú takýmto skúškam za účelom simulácie záťažovej histórie prebiehajúcej v priemysle. Vo väčšine prípadov je ale potrebné, aby skúšky boli navrhované za účelom nie len zodpovedania nami hľadaných otázok, ale aby nám výsledky napomohli k zovšeobecneniu a vzniku nových pravidiel týkajúcich sa medzi únavy s rozličnými ovplyvňujúcimi faktormi. Je preto nevyhnutné, aby sa skúšky vykonávali za podmienok buď to s ohľadom na postupnosť záťažových amplitúd, alebo na testovanú vzorku, alebo na oboje. Zjednodušením skúšobných podmienok by malo byť možné zmeniť jeden alebo viac faktorov, ktoré skúšku ovplyvňujú a zistiť ich účinok. Aj keď sa nám podarí tieto podmienky splniť, stále zostáva niekoľko neznámych a nekontrolovaných prvkov, ktoré vytvárajú rozptyl v únavových životoch telesách, ktoré sa dajú považovať za identické. V minulosti sa tento rozptyl nepovažoval za dôležitý a pre určenie únavového života sa používalo len zopár vzoriek. V dnešnej dobe sa tento rozptyl považuje za prirodzenú súčasť únavových vlastností a pre určenie únavového života je potrebné väčšie množstvo vzoriek. [4]

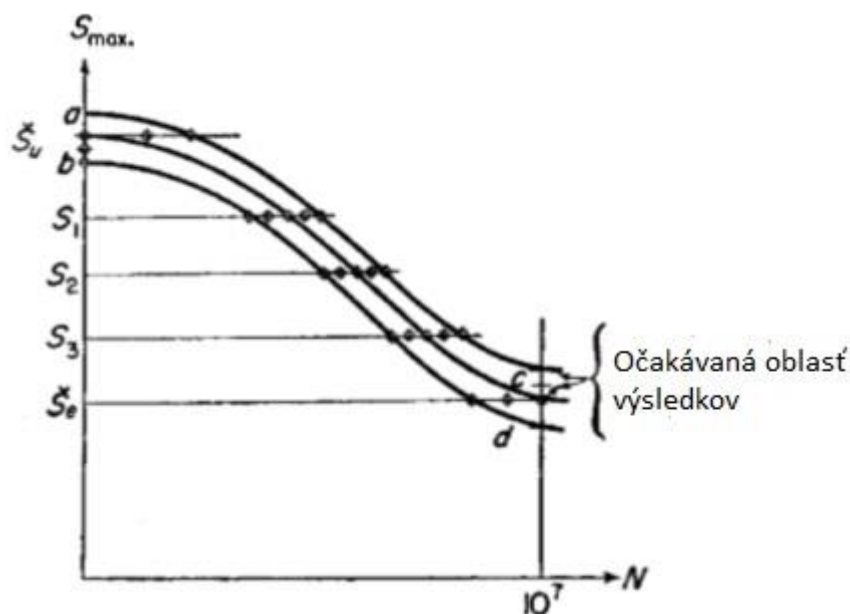
Najjednoduchším príkladom testov s ohľadom na amplitúdy zaťaženia je aplikovanie napätia konštantnej amplitúdy na skúšobné teleso pokiaľ nenastane lom. Pre nové teleso môže byť použité iné napätie, ale pre každé jednotlivé teleso sa amplitúda počas celej skúšky nemôže meniť. Tento typ únavovej skúšky sa nazýva skúška pri konštantnej amplitúde.

V závislosti na veľkosti amplitúdy napätia môžeme skúšky za konštantnej amplitúdy rozdeliť do troch kategórií:

1. Rutinné skúšky, kde použité napätie je vyberané tak, že pri všetkých skúškach nastáva lom po primeranom počte cyklov, povedzme od 10^4 do 10^7 .
2. Nízkocyklové skúšky, kde amplitúda napätia je volená z oblasti nad medzou klzu a v niektorých situáciách môže nastať lom okamžite po použití zaťaženia.
3. Vysokocyklové skúšky, pri ktorých je amplitúda napätia volená pod alebo mierne nad medzu únavy a porušenie vzorky nastáva pri 10^6 až 10^7 cyklov.

Samozrejme, neexistuje presná hranica, ktorá by oddeľovala jeden typ od druhého. [4]

Na obrázku 6 môžeme vidieť päť vzoriek o rovnakej veľkosti testovaných pri rôznych veľkostiach napätia. Môžeme predpokladať, že všetky vzorky s poradovým číslom od najmenej po najväčšiu únavovú životnosť budú mať približne rovnaké statické únavové vlastnosti, ktoré sú stvárané troma únavovými krivkami, z ktorých prostredná je medián a zvyšné dve sú extrémny. Predpokladaný rozsah pevnosti v ťahu S_u pre dané vzorky je zaznačený bodmi a-b a rozsah medze únavy S_N je ohraničený bodmi c-d. [4]



Obr.6: Krivka životnosti zobrazujúca štatistické rozloženie výsledkov [4]

Za predpokladu, že veľkosť napätia $S = S_u$, pri 50% testovaných vzorkách nastane porušenie pri prvom cykle a zvyšná polovica by mala mať únavovú životnosť väčšiu ako 1 cyklus. Rovnakým princípom ak $S = S_e$, 50% testovaných vzoriek by malo vydržať viac ako 10^7 cyklov.

Nízkocyklové skúšky teda zahŕňujú zaťaženia nad nižšou hranicou ťahovej pevnosti (bod b) a vysokocyklové skúšky zahŕňujú zaťaženia pod hornou hranicou medze únavy (bod c).[4]

Rutinné skúšky

Účel rutinných skúšok je zistiť vzťah medzi zaťažením a životom súčasti. V minulosti sa využívali hlavne za účelom stanovenia medze únavy odhadom krivky z nameraných hodnôt. Je zjavné, že výsledkom, ktoré sme získali odhadom empirických kriviek bez použitia správneho opatrenia by sme nemali brať vážne a odkedy sú dostupné lepšie skúšky pre určenie vlastností vysokocyklovej únavy použitie rutinných skúšok by malo byť obmedzené na škálu napätových úrovní, ktoré sú overené.

Tento typ skúšky je navrhovaný s cieľom vzniku lomu na všetkých vzorkách. V niektorých prípadoch a pri istých účeloch existuje dôvod pre prerušenie skúšky a to, keď pri istej časti pri každej úrovni napätia nastane lom. Rutinné testy teda môžeme rozdeliť na skúšky porušenia všetkých vzoriek a skúšky porušenia časti vzoriek. [4]

Skúšky porušenia všetkých vzoriek

Cieľom skúšky porušenia všetkých vzoriek je zvyčajne stanovenie vzťahu medzi únavovým životom a amplitúdou zadaného napätia na skúšobné teleso pričom stredné

napätie držíme konštantné. Výsledok a jeho prospešnosť závisí na celkovom množstve skúšaných vzoriek, na úrovniach napätia a na prerozdelení vzoriek na týchto stupňoch napätia.

Ak je počet skúšobných telies malý, jediná informácia, ktorú môžeme získať je odhad únavovej krivky zodpovedajúcej pravdepodobnosti lomu asi 50% prípadov.

Pre tvorbu únavového diagramu sa odporúča minimálne 10 skúšobných vzoriek, ale pre zostrojenie diagramu presnejšieho, ukazujúceho aj premenlivosť materiálu je odporúčané množstvo 50 vzoriek. Je samozrejmé, že počet skúšobných telies má veľký vplyv na výpočet hodnôt, no existujú ďalšie vplyvy, ktoré sú rovnako dôležité. V niektorých prípadoch skúška malého množstva vzoriek môže dať lepší výsledok, ako skúška obsahujúca 3 alebo aj 4krát viac vzoriek. Účinnosť skúšky závisí taktiež na úrovni napätia, na prirodzenom rozptyle skúšobného telesa a na druhu testovacieho prístroja, čiže malé množstvo skúšobných vzoriek môže byť vynahradené výhodnejším návrhom prostredia. Konvencia hovorí, že 20 až 30 vzoriek je potrebných na reálny odhad medze únavy a 50 až 100 vzoriek je potrebných pre vytvorenie prijateľnej únavovej krivky.

Výber úrovne napätia závisí na tom, kvôli čomu je skúška vykonávaná. Ak je záujem v oblasti vysokocyklovej únavy, volíme nízke napätia. Ak je našim cieľom celá únavová krivka, napätia volíme rovnomerne rozdelené od nízkych po vysoké. Odporúča sa, aby boli tieto skúšky doplnené o skúšky statické, najlepšie vykonávané na rovnakých skúšobných telesách.

Vplyv veľkosti napätia na presnosť skúšky môžeme popísať tak, že čím väčší je rozdiel medzi najväčšou a najmenšou hodnotou napätia, tým je väčšia presnosť. [4]

Skúšky porušenia častí vzoriek

Z praktického hľadiska je únavový život lepších vzoriek málo podstatný, pretože výpočet sa musí prevádzať na vzorkách s najkratším životom. Keďže celkový čas potrebný na testovanie je z veľkej časti určený vzorkami z oblasti vysokocyklovej únavy, je zrejmé, že zastavením skúšky po tom, ako pri určitých častiach vzoriek nastal lom by mohlo dôjsť k ušetreniu času.

K ušetreniu času dochádza pomocou metódy najmenej zo štyroch. Štyri vzorky sú súčasne testované a test sa preruší v okamihu, keď v jednej vzorke nastane porušenie. Podľa týchto údajov sme schopní zostrojiť krivku životnosti na 80% zhodnú s krivkou vytvorenou predchádzajúcou metódou. Skrátenie doby trvania skúšky môže byť dôležité v prípade, že je potrebné získať výsledky veľmi rýchlo, alebo ak by bola skúška veľmi nákladná.

V skúškach porušenia častí vzoriek a v skúškach porušenia všetkých vzoriek nie je žiaden podstatný rozdiel v testovacích technikách. Ak je dostupný postačujúci počet skúšobných prístrojov pre súčasné testovanie, skúška môže byť zastavená po presnom počte porušených vzoriek. Inak musí byť odhadnutá bezpečná hodnota strednej hodnoty života pre každú úroveň napätia a z toho vyplynie výsledný potrebný počet porušených vzoriek.

Tento typ skúšky môže byť považovaný za obmenu skúšky porušenia všetkých vzoriek a taktiež sa používa za účelom vytvorenia krivky životnosti. [4]

Skúšky nízkokycklovej únavy

Väčšina únavových skúšok do dnešnej doby bola venovaná určenia únavového života pri napätiach pod medzou klzu materiálov. V niektorých prípadoch je ale potrebná znalosť správania materiálu pod napätiami vedúcimi k únavovému porušeniu po malom opakovaní napät'ových alebo deformačných cyklov.

Jeden z problémov spojených so skúškami pod napätím vytvárajúcim veľkú plastickú deformáciu je presné udržiavanie zadaného zaťaženia, najmä stredného napätia. Z tohto dôvodu je efektívnejšie vytvárať skúšobné zariadenia založené na amplitúde pretvorenia ako na amplitúde napätia. Musíme zdôrazniť, že medzi krivkami zobrazujúcimi amplitúdu napätia na počte cyklov do lomu a amplitúde deformácie na počte cyklov do lomu je rozdiel a v súčasnosti nie je možné pretvoriť jednu do druhej.

Tieto dva spôsoby zaťažovania sú rovnocenné, pokiaľ sa skúšobné teleso správa ako dokonale elastické, respektíve pokiaľ existuje vzťah medzi pretvorením a použitým zaťažením. Pri malých napätiach je táto podmienka splnená do bodu, kým nevznikne prvá mikrotrhlina. Pri vysokých napätiach sa podmienka porušuje už pri prvých záťažových cykloch. Na základe týchto informácií môžeme skúšky nízkokycklovej únavy rozdeliť na skúšky s konštantnou amplitúdou napätia a skúšky s konštantnou amplitúdou pretvorenia. [4]

Skúšky vysokocycklovej únavy

Záujmom skúšok vysokocycklovej únavy je zistenie počtu percentuálneho rozloženia medze únavy pri vopred určenom počte cyklov do lomu. Od rutinných testov sa líši v tom, že pozorované hodnoty únavového života nie sú použité priamo, ale sú použité iba hodnoty z častí skúšobných telies, v ktorých nastalo porušenie pri rozličných stupňoch zaťaženia. Takýmto postupom prichádzame o časť informácií, ktoré sú skúškou poskytované. Preto sa odporúča, aby pozorované počty cyklov do lomu boli brané do úvahy ako časť rutinných testov a boli hodnotené podľa toho.

Skúšky vysokocycklovej únavy rozdeľujeme na skúšok pri konštantnom napätí, ktoré sa taktiež nazývajú reakčné skúšky a ďalej na skúšky s rastúcou amplitúdou napätia. [5]

Reakčné skúšky

Reakčné skúšky sú vykonávané podľa dvoch metód. Prvá, probitová metóda, využíva vopred určené veľkosti napätí a počet vzoriek pre každú veľkosť napätia. Druhá, schodisková metóda je postupná skúška, výber napätia je určený z predchádzajúceho výsledku. [5]

Probitová metóda

Úlohou probitovej metódy je určenie úplnej distribučnej funkcie medze únavy alebo jej časť. Skúšanie môže byť sústredené na rozličné časti prerozdelenia, ale počet skúšok potrebných pre bezpečný odhad do extrémnych percent je zakázaný. Bežný postup

je rozdeliť dostupné vzorky do niekoľkých skupín a každú skupinu testovať pri inej veľkosti napätia. Takto získané dáta, ktoré sú používané na hodnotenie pozostávajú zo vzoriek, kde nastal alebo nenastal lom pri jednotlivých veľkostiach napätia. Veľkosti napätí sú volené takým spôsobom, aby jedno z nich spôsobovalo lom takému percentu časti vzoriek pri vopred stanovenom počte cyklov do lomu, aké sme si zvolili. Odporúča sa aby boli dve napätia nad a dve pod priemerným napätím. Ak oblasť strednej hodnoty je totožná s nami hľadanou oblasťou, rozdiel medzi veľkosťami napätí môžu byť menšie a niekedy by boli postačujúce tri rozdielne veľkosti napätí. Na druhú stranu, čím väčšie rozdiely medzi veľkosťami napätí zvolíme, tým väčšiu oblasť sme schopný pokryť. [5]

Rozbor dát môže prebehnúť graficky, alebo analyticky. Ak boli použité rovnaké skupiny, je potrebné im priradiť váhu. Tejto komplikácii môžeme predísť, vytvorením viac skúšok, čo spôsobí väčší rozptyl. Ak je prerozdelenie považované za normálne, nasledujúca tabuľka navrhuje vhodné veľkosti skupín. Táto tabuľka môže byť použitá aj pre rozdelenie iné ako normálne. Pre prijateľnú presnosť reakčnej krivky je potrebných približne 50 vzoriek. [4]

Očakávané percento prežitia	Relatívna veľkosť skupiny
25 - 75	1
15 - 20	1.5
80 - 85	1.5
10 - 90	2
5 - 95	3
2 - 98	5

Obr.7: Tabuľka rozloženia skupín [4]

Schodisková metóda

Ak naša skúmaná oblasť je limitovaná na strednú hodnotu medze únavy, pre zníženie počtu potrebných vzoriek sa používa schodisková metóda. Prvá skúška prebieha pri napätí o veľkosti odhadovanej priemernej hodnoty medze únavy. Ak nastane lom pred dosiahnutím vopred určenom počte cyklov, nová vzorka je testovaná pri menšom napätí. Ak na tejto nenastane porušenie, ďalšia bude skúšaná pri vyššom napätí. Rozdiely medzi napätiami by sa mali rovnať štandardnej odchýlke, ale táto podmienka nie je záväzná, no rozdiel by nemal prekračovať dvojnásobok tejto odchýlky. Skúška pokračuje takýmto spôsobom. Napätia sa buď zvýšia, ale znížia v závislosti na predchádzajúcom výsledku. Tento postup je výsledkom skúšky koncentrovanej hlavne na tri veľkosti napätia, ktoré sú sústredené v okolí priemernej hodnoty medze únavy. Z tohto dôvodu je na určenie priemernej hodnoty táto metóda účinnejšia, pretože na ňu stačí o 40 % vzoriek menej ako pri probitovej metóde. Nevýhodou je ale, že môžeme testovať iba jednu vzorku naraz a teda ak by bolo potrebných viac ako 30 vzoriek, skúška by bola časovo náročná. V tomto prípade môže nastať malá zmena a to, že všetky vzorky rozdelíme do podskupín a každá skupina môže byť potom skúšaná samostatne nezávisle na zvyšku. [5]

Skúšky s rastúcou amplitúdou

Za účelom šetrenia času a vzoriek sa zdá byť lákavé použiť znova vzorku, ktorá už bola použitá a vydržala vopred daný počet cyklov. Únavové vlastnosti ako najmä medza únavy sa môžu značne meniť v dôsledku predpätia. Účinok predpätia je závislý na druhu materiálu a koncentrátoroch napätia vzorky. Ak nie je preukázané, že tento jav môžeme považovať za zanedbateľný, výsledky skúšok s rastúcou amplitúdou môžu byť zavádzajúce, ale pre niektoré typy materiálov sú postačujúce. Tento typ skúšky môže byť prevádzaný dvoma spôsobmi. Prvá možnosť je rozdeliť veľkosti napätí do krokov a podľa toho sa volá kroková metóda. Druhá možnosť je postupne zvyšovať napätie. Táto možnosť nesie názov po svojom objaviteľovi a volá sa Protova metóda. [4]

Kroková skúška

Kroková skúška by mala začínať pri napätiach začínajúcich pri veľkostiach spôsobujúcich porušenie približne u 30% vzoriek pri vopred stanovenom počte cyklov, čo zvyčajne býva 10^7 .

Ak vzorka vydrží, zvýšime napätie na hodnotu, ktorá by mala spôsobiť porušenie o 5% viac vzoriek. Tento proces je opakovaný na rovnakej vzorke až dokým nenastane lom. Za medzu únavy sa považuje priemer medzi poslednými dvoma napätiami. Táto metóda potrebuje najmenej 10 vzoriek na určenie medze únavy. [5]

Protova skúška

Ak má byť medza únavy určená pomocou zvyšovania amplitúdy napätia, je vhodné, aby sa napätie zvyšovalo priebežne. Tento spôsob skúšania bol zavedený Protom, ktorý ho realizoval na prístroji spôsobujúcom ohyb za rotácie. Skúška začína pri napätí, ktoré je odhadované na 60 až 70% medze únavy a dvíha sa konštantnou rýchlosťou. Tento proces sa opakuje so skupinou vzoriek. Ďalšie dve skupiny vzoriek sa testujú pri inej rýchlosti zvyšovania napätia. Najmenšia rýchlosť by mala byť tak malá ako je len možné a najvyššia by nemala presahovať hodnotu spôsobujúcu lom. Pre tento spôsob skúšky je potrebných najmenej 10 vzoriek pre každú skupinu, čo je približne trikrát viac ako pre krokovú metódu. [5]

Skúšky kumulovania poškodenia

Táto skúška sa od predchádzajúcich odlišuje v tom, že každá vzorka je podrobená viac ako len jednému napätiu. Účelom skúšky je objaviť vzťahy týkajúce sa únavového života vzorky pomocou rozličnej postupnosti zadávania napätia za cieľom predpovedania bezpečného života častí strojov, alebo zostáv z napätí pôsobiacich v reálnych situáciách. Vzorka je podrobená jednotlivým napätiam, alebo pevne stanoveným napäťovým cyklom pozostávajúcich z dvoch alebo viacerých amplitúd napätí, po ktorých sa odmeria aké únavové poškodenie na vzorke vzniklo. Na meranie sa používajú rozličné metódy. Najpoužívanejšia pozostáva z aplikovania pevného napätia na skúšobné teleso, ktoré

nazývame skúšobné napätie, pokiaľ nenastane lom. Zvyšný život sa používa na meranie poškodenia. Zistilo sa, že toto meranie závisí úplne na veľkosti zvoleného napätia. Jediná bezpečná metóda navrhnutia skúšobného napätia sa zdá byť zostrojenie celkovej únavovej krivky. Za týmto účelom je skupina rovnakých skúšobných telies podrobená špeciálnemu únavovému zaobchádzaniu. Potom môžu byť považované za nové skúšobné telesá s rozdielnymi únavovými vlastnosťami, ktoré sa porovnávajú s pôvodnými skúšobnými telesami. V špeciálnych prípadoch môže byť tento komplikovaný proces nahradený jednoduchým určením medze únavy, medze pevnosti, alebo inou štatistikou nášho záujmu. Každopádne porušenie skúšobného telesa nastáva pri vopred určenom napätí. Skúšky únavového poškodenia môžeme rozdeliť do dvoch skupín na základe charakteru únavového zaobchádzania. Prvé, skúšky predzaťaženia (preloading) sú definované skoršou úpravou pozostávajúcej z jedného alebo viac predzaťažení. Druhé, skúšky predpätia (prestressing), kde predchádzajúce úpravy pozostávajú z jedného alebo viac krokov. Za každý krok sa považuje pevný počet napät'ových cyklov s konštantnou amplitúdou napätia a stredným napätím. [4]

Skúšky predzaťaženia

Na skúšobné teleso sa najskôr použije zaťaženie ťahové, alebo tlakové, ktoré ovplyvní jeho únavové vlastnosti. Tento typ skúšky sa využíva najmä v súvislosti s vrubovanými vzorkami alebo súčiastkami slúžiacimi pre nitové alebo skrutkované spoje, kde predzaťaženie môže často mať prospešné účinky vyplývajúce z vyhladenia počiatočných koncentrátorov napätia. Predzaťaženie môže byť použité dané množstvo krát, po zadaní skúšobného napätia. [4]

Skúšky predpätia

V tejto metóde testu je na skúšobné teleso nepretržite aplikovaná rôzna amplitúda napätia v jednom alebo viac krokoch. Tieto skúšky sú hlavne využívané na prešetrovanie škodiaceho účinku zjednodušených kombinácií krokov alebo stupnice s ohľadom na počet cyklov predpätia, rozdiely medzi rastúcimi alebo klesajúcimi poradiami napätí. [4]

Skúšky napodobňujúce reálny situácie (Service-simulating tests)

Súčasti sú v reálnych situáciách vystavované extrémne komplikovaným spôsobom napät'ových cyklov rozličných amplitúd a stredných napätí, ktoré sa objavujú v náhodnom poradí a musia byť preto opísané štatistickými vzťahmi. Aby sme mohli tieto podmienky napodobniť v strojoch pre únavové skúšky, je potrebné vykonať značné zjednodušenia.

Pre tieto zjednodušenia poznáme dva spôsoby. Prvá alternatíva sa nazýva programová skúška (programme testing), kde blok, množina krokov, z ktorých každý pozostáva z pevného počtu cyklov jednej amplitúdy, je opakovane zadávaný na skúšobné teleso až kým nenastane lom. To môže nastať počas ktoréhokoľvek kroku. Druhá možnosť sa nazýva rozsahové skúšanie (spectre testing) a je určené podmienkou, že napätia, ktoré po sebe nasledujú majú inú veľkosť, usporiadané podľa istého vzoru. [4]

Programové skúšky

Relatívna frekvencia napät'ových cyklov istej amplitúdy sa určí pomocou počítačieho nástroja. Je vybraný obmedzený počet amplitúd a každej je pridelený pevný počet cyklov, čím sa vytvorí krok. Čím menej cyklov je v každom kroku, tým sa simulácia viac podobá reálnej situácii. Podmienkou ale je, že napätie s najväčšou amplitúdou musí mať minimálne jeden, ale uprednostňuje sa viac cyklov v kroku. Navyše, bežné skúšobné prístroje pracujú lepšie, ak je čo najmenej zmien amplitúdy, musíme brať ale na vedomie, aby bola naša simulácia stále prijateľná v porovnaní s realitou. Kroky sa zoskupia do blokov, ktoré sa opakujú kým nenastane lom, bez toho aby sa menilo poradie krokov v bloku. Bolo predstavené vylepšenie tejto metódy tým, že kroky v jednotlivých blokoch sú náhodne poprehadzované. Odtiaľ názov náhodná programová skúška. Ďalšou obmenou tejto skúšky je skúška periódy návratu(return period test), kde každé zaťaženie sa objavuje v pevne daný čas, ktorý je stanovený zo záťažového rozsahu nahratého zo skutočnej prevádzky. [4]

Rozsahové skúšky

Rozsahové skúšky predstavujú viac reálne napodobnenie skutočnej prevádzky, ale vyžadujú nové testovacie stroje, alebo aspoň zmeny vo zvyčajných. Najjednoduchšie je túto podmienku možné splniť stlmením amplitúdy pri skúške ohybu za rotácie, alebo superpozíciou dvoch rozličných frekvencií. Podmienka nahrádzania relatívnymi frekvenciami pre každú amplitúdu napätia nie je splniteľná jednoducho, ako sme spomínali v programových skúškach.

Úplná náhodnosť rozsahových skúšok je zamiešaním jednotlivých napät'ových cyklov. To sa vykonáva na elektromechanických skúšobných strojoch podľa zadaného napätia získaného zo skutočnej prevádzky. [4]

Stroje pre vykonávanie únavových skúšok

Zariadenia vykonávajúce únavové skúšky môžeme rozdeliť do troch hlavných kategórií. Prvá sú nástroje pracujúce s konštantným napätím, napríklad ohybovým, alebo ťahovým. Druhá sú zariadenia pracujúce s konštantným posunutiami a tretia sú servo-riadené univerzálne skúšobné stroje. Použitie prvých dvoch je limitované na vytvorenie kriviek životnosti, zatiaľ čo servo-riadené skúšobné stroje sú všestranne využiteľné, no použitie týchto strojov pre únavové skúšky, ktoré vyžadujú istý čas je nákladné.

Zát'až produkovaná mechanickým vychýlením

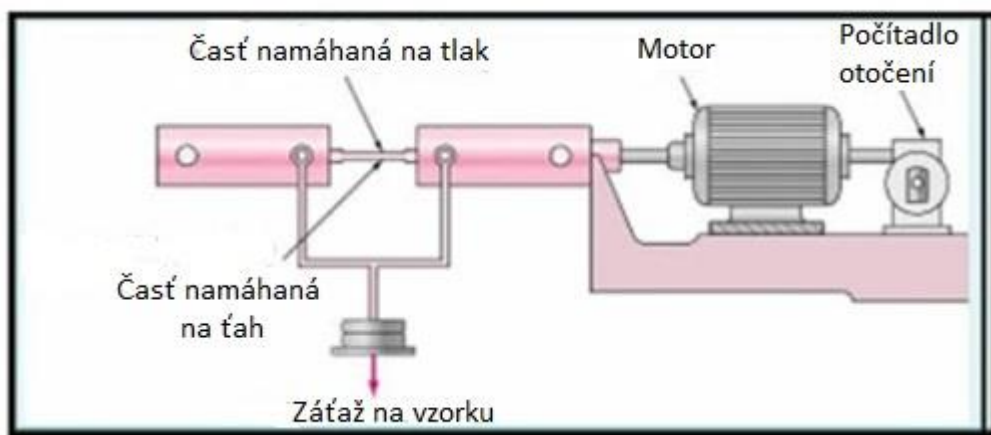
Prvý a asi najjednoduchší spôsob zadávania konštantnej amplitúdy napätia axiálne bol zostrojený Wohlerom v roku 1871. Spočíval v prichytení navíjacej pružiny na jeden koniec vzorky a na druhý priamy kľukový pohon spôsobujúci spätný pohyb. Slabé pružiny a sily spôsobené vlastnými frekvenciami obmedzovali rýchlosť stroja na 100 e/min. V súčasnosti sme ale schopní pracovať pri rýchlosti 1000e/min. ďalším spôsobom je nahradiť pružiny visiakmi závažími, na ktoré pôsobí tiaž. V takomto prípade je možné dosiahnuť rýchlosť 120 otočení za minútu so vzorkami s priemerom 2-5 mm.

V prípade, že sa jedná o ohyb zadávame skorej konštantnú amplitúdu pretvorenia, alebo konštantný moment. Princíp spočíva v ohýbaní vzorky hore a dolu v jednej rovine. Rovnomerný moment môže byť dosiahnutý buďto uchytením vzorky do dvoch pák, jednej pevnej a druhej s možným spätným pohybom pomocou nastaviteľnej kľuky, alebo pevným uchytením stredného bodu vzorky a použitím pohybu po kruhových oblúkoch na koncoch vzorky. Rýchlosť týchto strojov môže dosahovať až 3000 e/min. V prípade ohybu za rotácie, je jeden koniec vzorky pevne prichytený a pôsobí naňho nulový moment. Druhý je uložený v ložisku, ktoré voľne rotuje.

Pri krute sa využíva kľukový pohon zavedený priamo na vzorku v spolupráci so špirálovou pružinou, alebo krútiacim závažím. Krútiace závažie môže byť taktiež nahradené zotrvačníkom, čo by umožňovalo testovať dve vzorky naraz. [4,6]



Obr.8: 300 Series univerzálny testovací stroj [7]



Obr.9: Schéma stroja so závažím produkujúcim záťaž [8]

Zát'az vytvorená odstredivou silou

Ďalší spôsob ako dosiahnuť osovú zaťaženie je pomocou odstredivej sily. Tá bola vyvolaná dvoma závažiami rotujúcimi za rýchlosti 3000 ot/min a pôsobila iba vo vodorovnom smere. Pre využitie vlastnej frekvencie, čím sme schopný niekoľkonásobne zvýšiť silu sa používa jedno rotujúce závažie vyrábajúce vibrácie v špirálovitej pružine.

Veľmi častou metódou pre vytvorenie opakovaného ohybového napätia je použitie mechanických oscilátorov, ktoré majú na sebe dva nevyvážené závažia. Tieto oscilátory produkujú odstredivú silu pôsobiacu v jednej rovine. Skoro vždy pracujú pri rýchlosti blížiaci sa vlastnej frekvencii vzorky.

Pri krutových skúškach sa taktiež môžu používať mechanické oscilátory. Ďalšou možnosťou je použiť rezonančný systém poháňaný rotujúcim nevyváženým závažím. Takýmto spôsobom je možné vytvoriť krútiaci moment 2 800 N.m pri rýchlosti 300 ot/min. [4,6]

Zát'az produkovaná elektromagnetickými silami

Elektromagneticky poháňané skúšobné stroje môžu pracovať pri veľmi vysokých frekvenciách. Princíp pozostáva z uloženia armatúry medzi dva magnety. Jeden koniec vzorky je pripojený k nosnej konštrukcii a druhý k armatúre, ktorá je pripojená k dvojitej konzolovej pružine. Vlastná frekvencia sústavy bez vzorky sa uvádza k rezonovaniu pomocou dĺžky konzoly. Pridaním vzorky sa zvyšuje vlastná frekvencia sústavy v dôsledku čoho stroj pracuje pod hodnotou rezonovania, čo ale vynahrádzajú zotrvačné sily. Tieto stroje sú schopné pracovať pri frekvenciách 30 000 e/min.

Problém s kontrolou amplitúdy vibrácií pri malých medziach bol vyriešený zavedením nového jednoduchšieho obvodu s prednastavenou žiadanou amplitúdou, kontrolovanou pomocou mikrometra.

Pri krute sa armatúra používa ako zotrvačník pripojený sériovo na vzorku a celý systém je poháňaný statorom, do ktorého ide elektrický prúd. V niektorých prípadoch je možné použiť dva zotrvačníky pre odstránenie ohybových vibrácií.[4,6]



Obr.10: Elektromagnetický rezonančný vysokofrekvenčný stroj na únavové skúšky [9]

Zát'až vyprodukovaná hydraulickými silami

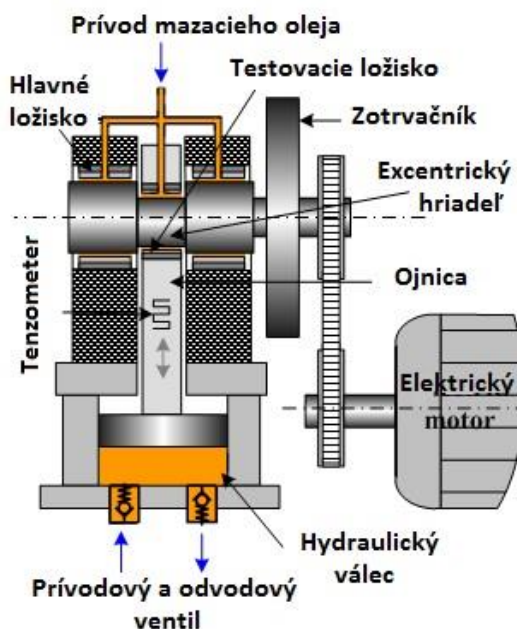
Veľmi vysoké zaťaženia do hodnoty až 5000 kN a dynamické amplitúdy je možné dosiahnuť za pomoci hydraulických strojov. Prvý stroj pozostával z pulzátoru pripevnenému k zvyčajným ťahovým zariadeniam. Problém so zmenou zaťaženia počas toho ako je stroj v prevádzke bol vyriešený dvoma spôsobmi. V prvej sa čerpadlo skladá z dvoch rovnakých otočných válcov a pomocou zmeny uhla medzi nimi je objem hnaný z jedného válca do druhého. Takto hnaný objem vytvára na vzorke potrebné zaťaženie. V druhom prípade sú oba válce pevne uchytené a rýchlosť je zmenená pomocou diferenciálnej prevodovky.

Ďalší návrh hydraulického stroja je pomocou oleja, pri vysokom tlaku, vypusteného do jednej alebo oboch strán piestu s veľkým priemerom pripojeného k vzorke. Pohyb piestu je kontrolovaný únikmi.

Charakteristickou črtou hydraulických únavových skúšobných strojov je, že ich rýchlosť je limitovaná. Pri veľkých strojoch je možné dosiahnuť rýchlosť 2000 e/min.[4,6]



Obr.11: 301 Series hydraulický testovací stroj [10]



Obr.12: Skúšobné zariadenie na testovanie ložísk motora pomocou hydraulického zaťaženia [11]

Tvorba krivky životnosti

Výsledky skúšok z rôznych veľkostí napätí sa zvyknú vykresľovať vo formách kriviek životnosti, kde amplitúda napätia sa zvyčajne vykresľuje na jednu os a počet cyklov do lomu na druhú. Počet cyklov do lomu sa značne mení s rôznymi veľkosťami napätí a môžu sa líšiť aj niekoľko rádov. Z dôvodu lepšej prehľadnosti v oblasti vysokých napätí sú počty cyklov do lomu zvyčajne vykresľované v logaritmickej škále. Ak sa dáta približujú priamke na lineárno-logaritmickom grafe, na matematické vyjadrenie tejto krivky môžeme použiť rovnicu:

$$\sigma_a = C + D \log N_f. \quad (4)$$

V tejto rovnici C a D predstavujú konštanty. Pre opis dát približujúcich sa priamke na log-log grafe používame rovnicu

$$\sigma_a = A N_f^B. \quad (5)$$

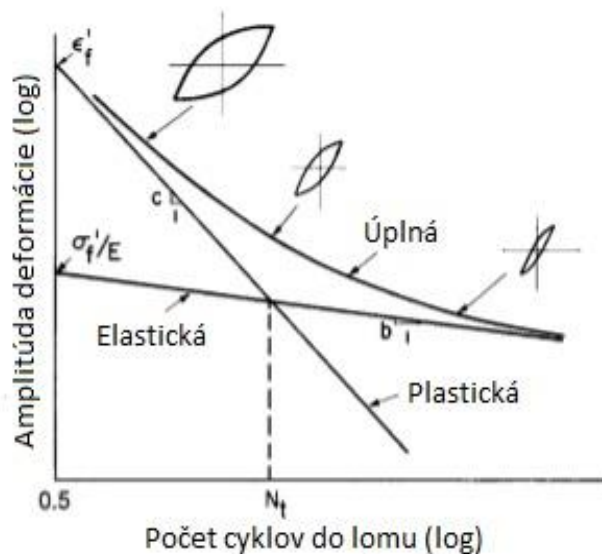
Táto rovnica sa často používa aj v tejto forme

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b. \quad (6)$$

Príslušné konštanty sú prepojené pomocou vzťahov

$$A = 2^b \sigma'_f, \quad B=b \quad (7)$$

Tieto rovnice sú výhodné použiť pri popise vysokocyklovej únavy, kde vzniká malá plastická deformácia. Pre vykresľovanie kriviek životnosti v nízkokycklovej únavy sa viac využíva spôsob pomocou použitia amplitúdy pretvorenia namiesto amplitúdy napätia. Tieto krivky sa vytvárajú pomocou dát získaných zo skúšok pri symetrickom zaťažení a obmedzených deformáciách. Pri každej skúške amplitúdy napätia, deformácie a plastickej deformácie sú odmerané z hysteréznej slučky vytvorenej približne v polovici odhadovaného únavového života, kedy väčšina spevňovania a zmäkčovania prebehlo a slučku môžeme považovať za stabilnú. Amplitúda deformácie môže byť rozdelená na elastickú ϵ_{ea} a plastickú ϵ_{pa} časť. Je vhodné k celkovej plastickej deformácii vykresliť súčasne aj plastickú a elastickú deformáciu voči počtu cyklov do lomu. [12]



Obr.13:Graf úplnej, plastickej a elastickej deformácie znázornených na amplitúde deformácie voči počtu cyklov do lomu [12]

Z obrázka 13 môžeme vidieť, že elastická deformácia pripomína priamku s veľmi malým sklonom a plastická deformácia priamku s väčším sklonom. Rovnice opisujúce tieto priamky môžeme potom zapísať v nasledujúcom tvare:

$$\varepsilon_{ea} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b. \quad (8)$$

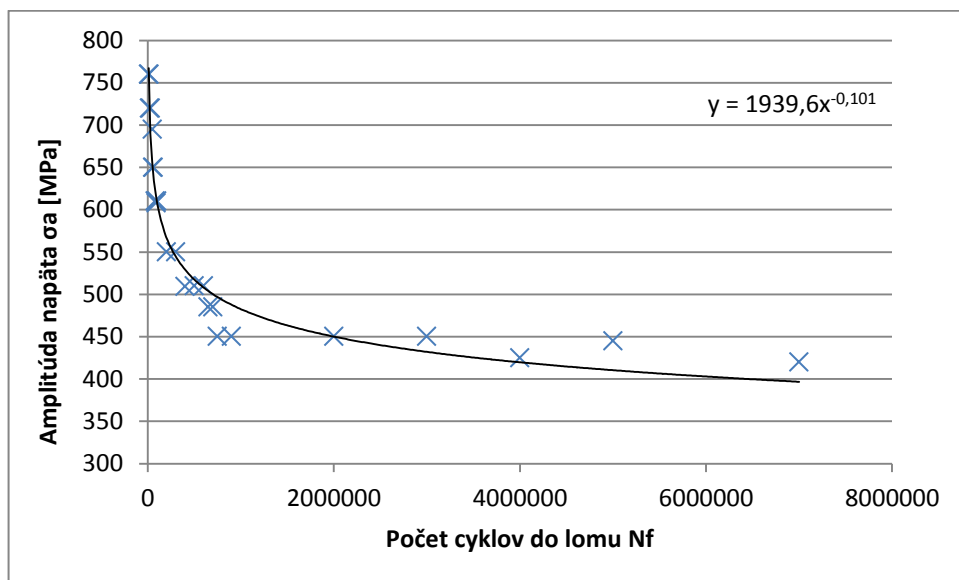
$$\varepsilon_{pa} = \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (9)$$

V týchto rovniciach b a c predstavujú exponenty únavovej životnosti. Konštanty $\frac{\sigma'_f}{E}$ a ε'_f sa po dohode vyhodnocujú pre počet cyklov do lomu $N_f = 0,5$ a preto je potrebné zadávať veľkosť $(2N_f)$ do rovníc. Spojením týchto rovníc dostávame vzťah pre celkovú amplitúdu deformácie:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (10)$$

Veličiny σ'_f , b , ε'_f a c sú materiálové konštanty. Môžete si všimnúť, že rovnica (8) určuje vzťah medzi napätím a životom súčasti, ktorý sme predtým vyjadrili pomocou rovnice (6). Z toho vyplýva, že ak sú používané dáta z veľkého rozsahu životnosti pre určenie deformačných konštánt, rovnica (10) zahrňuje napäťovú krivku ako hraničnú hodnotu pre malé plastické deformácie. Rovnice (10) a (6) môžu byť teda používané do veľkých životností, v ktorom prípade hodnota b sa zmenší až na hodnotu nula pre materiály so zreteľnou medzou únavy. Pre spracovanie výsledkov z meraní používaných v priemyselnej praxe sa používa norma ČSN 01 0250. [12]

Ako ukážku prikladám krivku životnosti, vytvorenú z dát získaných zo skúšky ohybom za rotácie pre skúšobné telesá bez vrubu. Hodnoty boli vykreslené v lineárnej mierke na osi amplitúdy napätia ako aj na osi počtu cyklov do lomu.



Obr.14: Graf krivky životnosti

Záver

Cieľom tejto práce bolo vykonanie rešeršnej štúdie a spracovania informácií z oblasti vykonávania únavových skúšok a následného vytvárania únavových kriviek na základe získaných údajov.

Na začiatku práce je spomenuté základné rozdelenie únavového života súčasti na tri štádia, ktorých zohľadnenie do úvahy je neodmysliteľne potrebné pre zváženie použitia a výberu metódy tvorby únavovej skúšky a rovnako aj pre vyhodnotenie výsledkov tejto skúšky.

Následne boli spísané jednotlivé typy únavových skúšok, ktoré sa vykonávajú za účelom tvorby kriviek životnosti, rozdelené vzhľadom na spôsoby vykonávajúce zaťaženia na skúšobných telesách. Z porovnania môžeme vidieť, že z hľadiska času je najvýhodnejší typ vytvárajúci zaťaženie elektromagnetickými silami, pretože je schopný pracovať pri frekvenciách 30 000 e/min a teda je najvhodnejší pre oblasti vysokocyklovej únavy. Prístroje vykonávajúce záťaž pomocou hydraulických síl sa zase preukázali byť najvhodnejšie pre použitie veľkých zaťažení, pretože dokázali pracovať so zaťažením pri hodnote až 5000kN.

V poslednej časti práce sú spracované, spôsoby akými sa vytvárajú krivky životnosti z dát získaných z únavových skúšok a rovnako aj rovnice, ktoré tieto krivky popisujú v oblastiach či už vysokocyklovej únavy, alebo nízkykcyklovej únavy, ktorá je doplnená o mnou vytvorenú únavovú krivku preloženú bodmi pomocou programu Microsoft Excel.

Zoznam použitej literatúry

- [1] PANTĚLEJEV, Libor. Únava kovových materiálů [online]. Brno, 31 s. [cit. 21.5.2017]. Dostupné z <<http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf>>
- [2] ONDRÁČEK, E., J. VRBKA, P. JANÍČEK a J. BURŠA. Mechanika těles: Pružnost a pevnost II. 4. přeprac. vyd. Brno: CERM, 2006, 262 s. ISBN 80- 214-3260-8.
- [3] ANDERSON, T. Fracture mechanics: fundamentals and applications. Boca Raton: Taylor, 2005, 621 s. ISBN 08-493-1656-1.
- [4] WEIBULL, W. Fatigue Testing and Analysis of Results. Pergamon 1961, 320 s. ISBN 9781483154169.
- [5] DYLAŁ, Zdzisław a Zbigniew ORŁOŚ. *Únava materiálu a její zkoušení*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968.
- [60] BOYER, Howard E. *Atlas of fatigue curves*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, c1986. ISBN 0871702142.
- [7] TestResources [online]. 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z <<http://www.testresources.net/test-machines/universal-testing-machines/300-series-universal-test-machine/>>.
- [8] Mechanical engineering [online]. 2017, 1st of January [cit. 2017-05-21]. Dostupné z <<https://pursuitengineering.blogspot.cz/2017/01/fatigue-testing.html>>.
- [9] Solutions for Materials Testing [online]. 2017, 22nd of April [cit. 2017-05-21]. Dostupné z <<http://www.testingequipmentie.com/electromagnetic-resonance-high-frequency-fatigue-testing-system-p-1121.html>>.
- [10] Shore Western [online]. 2017, [cit. 2017-05-21]. Dostupné z <<http://www.shorewestern.com/tabletop.php>>.
- [11] SubsTech [online]. 2016, 10th of July [cit. 2017-05-21]. Dostupné z <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=engine_bearing_fatigue_test>.
- [12] DOWLING, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

Zoznam použitých symbolov a skratiek

σ	[MPa]	nominálne napätie
σ_a	[Mpa]	amplitúda napätia
ε_{ap}	[-]	amplitúda plastickej deformácie
ε	[-]	deformácia
ε_{ea}	[-]	amplitúda elastickej deformácie
ε_{at}	[-]	amplitúda celkovej deformácie
σ_c	[Mpa]	medza únavy
K_I	[MPa*m ^{$\frac{1}{2}$}]	faktor intenzity napätia
a	[m]	dĺžka trhliny
$Y_1(\frac{a}{b})$	[-]	tvarová funkcia
K_{th}	[MPa*m ^{$\frac{1}{2}$}]	prahová hodnota
K_{IC}	[MPa*m ^{$\frac{1}{2}$}]	lomová húževnatosť
v_t	[m/s]	rýchlosť šírenia trhliny
C, m		materiálové charakteristiky
α	[-]	súčiniteľ tvaru
σ_k	[MPa]	medza klzu
r_k	[-]	veľkosť plastickej oblasti
S_u	[MPa]	rozsah pevnosti v ťahu
S_N	[MPa]	rozsah medze únavy
N_f		počet cyklov do lomu
E	[MPa]	Youngov model pružnosti
σ'_f	[-]	súčiniteľ únavovej pevnosti
ε'_f	[-]	súčiniteľ únavovej ťažnosti
b, B, c		exponent únavovej životnosti
C, D		konštanty

Zoznam obrázkov

Obrázok 1	Štádiá únavového procesu.....	10
Obrázok 2	Schéma hysteréznej slučky	11
Obrázok 3	Tri základné módy zaťažovania telesa s trhlinou.....	13
Obrázok 4	Závislosť rýchlosti šírenia trhliny na súčiniteli intenzity napätia	13
Obrázok 5	Plastická oblasť v telese s trhlinou.....	14
Obrázok 6	Krivka životnosti zobrazujúca štatistické rozloženie výsledkov	16
Obrázok 7	Tabuľka rozloženia skupín.....	18
Obrázok 8	300 Series univerzálny testovací stroj	23
Obrázok 9	Schéma stroja so závažím produkujúcim záťaž	24
Obrázok 10	Elektromagnetický rezonančný vysokofrekvenčný stroj na únavové skúšky.....	25
Obrázok 11	301 Series hydraulický testovací stroj.....	26
Obrázok 12	Skúšobné zariadenie na testovanie ložísk motora pomocou hydraulického zaťaženia	26
Obrázok 13	Graf úplnej, plastickej a elastickej deformácie znázornených na amplitúde deformácie voči počtu cyklov do lomu.....	27
Obrázok 14	Graf krivky životnosti	28